

전송선로 이론을 이용한 회전기내 부분방전 검출 센서 해석 및 설계

허창근*, 강동식**, 정현교*
*서울대학교, **한국전기연구원

Design of Partial Discharge Sensor using Transmission Line Theory in Rotating Machine

Chang Geun Heo*, Dong Sik Kang**, Hyun Kyo Jung*
*Seoul National University, **Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 고전압 기기의 절연물 내부에서 부분방전 현상이 발생되면 절연파괴로 진전된다. 회전기기가 운전중인 상태에서 on-line 부분방전시험을 고정자 권선의 절연상태를 검사, 평가 할 수 있는 중요한 수단으로서 이러한 부분방전시험을 통하여 회전기기 시스템의 사고예방을 위한 진단을 할 수 있다. 부분방전 펄스는 10MHz ~ 1GHz의 대역폭을 갖는 것으로 알려져 있으며, 이러한 고주파 대역의 전자파 에너지의 효과적인 검출을 위한 센서 중 하나로 웨이브가이드 구조의 고주파 검출센서가 존재한다. 기존의 전자기적 에너지를 검출하는 SSC (Stator Slot Coupler)센서를 한쪽 포트를 가지는 마이크로스트립센서 형태로 사용할 경우 접지면이 도체 전체로 썩어져 있고 임피던스 정합을 위한 50옴의 칩저항이 신호라인과 접지사이에 루프를 형성하여 기기 운전시 기기의 성능에 영향을 미칠 수 있는 단점을 가지고 있다. 이 단점을 보완하기 위해서 본 논문에서는 회전기내 부분방전 펄스의 전자기적 에너지를 검출할 수 있는 2선 평행 전송선로 라인을 응용한 부분방전 검출 센서를 제안하였고 시뮬레이션을 통해 성능을 입증하였다. 제안된 센서의 성능을 입증하기 위하여 2선 평행 전송선로 타입의 센서와 기존의 SSC (Stator Slot Coupler) 센서를 약간 변형시킨 마이크로 스트립 센서를 고정자 슬롯의 Wedge 부착한 후 두 센서 비교 분석하였다. 결과적으로 제안된 센서는 기존 SSC 타입의 마이크로스트립 센서에 비하여 더 간단한 형상을 가지며 운전 중 기기의 성능에 영향을 덜 미치는 효과를 얻을 수 있었다.

하지만 센서의 간단한 제작과 기기내의 설치 용이함을 위해 한쪽 포트만 SSC를 사용하기 위해 변형된 마이크로스트립센서를 제작할 경우 전자파의 차폐효과를 가져오는 도체의 접지면이 센서 뒷 부분 전면에 위치하므로 실제 구조인 고정자 권선에 설치 시 기기의 성능에 영향을 미칠 수 있다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 본 논문에서는 두 도선으로 이루어진 전송선로를 이용하여 전자파를 가이드하는 구조의 센서를 제안하였다. 이 구조는 기존의 SSC 타입의 마이크로 스트립처럼 전체 형상의 크기가 작고 고정자 권선에 부착하기 쉬우며 제작이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 이 센서는 고정자 권선 위의 wedge에 설치되며 두 원통도선이 일정한 거리를 두고 코일의 길이방향으로 놓여져 있는 구조로 이루어져 있다. 설치의 용이함을 위해 도선의 주변을 절연물질로 코팅하였다. 이 평행 도선의 전파모드는 TEM (Transverse ElectroMagnetic) mode로 설명할 수 있다.

1. 서 론

가동 중인 전동기나 발전기 등의 회전기내 고정자 권선의 전연상태를 평가하기 위하여 부분방전 검출이 필요하다. 절연시스템에서 열화와 사고의 대부분은 전기적, 기계적, 열적 및 화학적 원인에 의해 절연체 내에 발생한 공극(void)과 같은 국부적인 결함부에 기인하는 것으로 알려져 있다. 이러한 유전체를 포함한 공극에서의 부분방전은 수 나노의 상승시간과 폭을 가지는 펄스의 형태로 다중방전의 성향을 나타낸다. 그러므로 부분방전시 전자파의 전파현상도 매우 복잡하며 단순한 등가회로 모델로는 그 전파현상을 고려할 수 없다. 그래서 FDTD(Finite Difference Time Domain method)나 FEM(Finite element Method)등을 이용한 수치해석 방법이 적용되고 있으며 본 논문에서는 이러한 수치해석에 기반을 둔 Ansoft의 HFSS 상용프로그램과 CST 의 MWS(Microwave Studio)를 사용하였다 [3, 4].

기존의 SSC(Stator Slot Coupler)센서는 터빈 발전기와 고전압 회전기기의 부분방전 검출을 위한 센서로서 H.G Sedding에 의해 제안되었다 [1, 2]. 이 센서의 구조는 간단한 마이크로스트립 구조이므로 그 구조가 작고 부착하기 쉬우며 제작비용이 저렴하다는 장점을 가지고 있다.

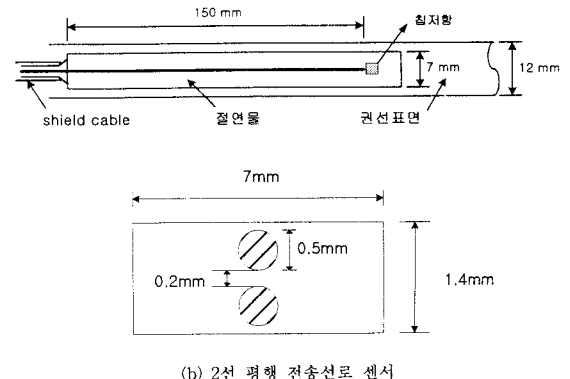
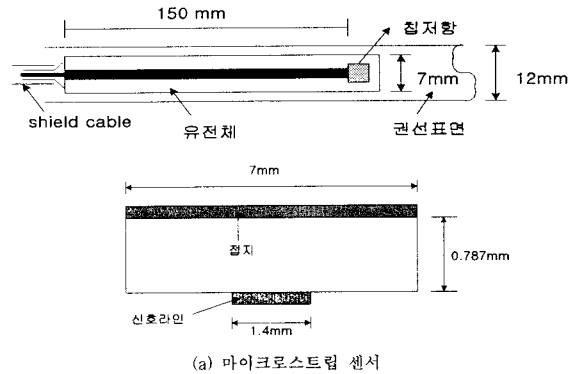


그림 1. 센서의 구조

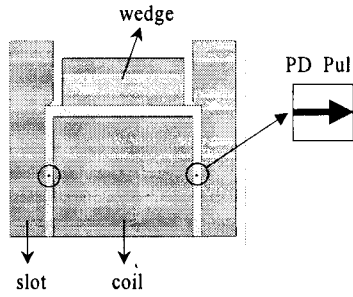
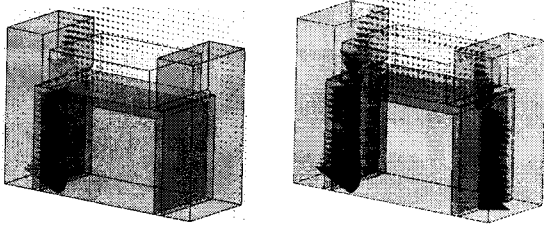


그림 2. 시뮬레이션 모델로 사용된 모터 슬롯 구조

2. 본 론

2.1 센서의 구조

센서를 고정자 권선의 wedge위에 설치 할 경우 설치 공간의 제약으로 인해 센서는 그 크기에 제약을 받게 된다.



(a) 1개의 부분방전펄스

(b) 2개의 부분방전펄스

그림 3. 부분방전 시 전자파의 전파경로

제안된 센서는 크게 접지라인과 신호라인, 유전체 부분으로 구분되며 한 개의 출력 포트를 가진다. 원통 도선의 지름은 0.5mm 이며 두 도선의 중심사이 거리는 0.7mm , 둘러싼 유전체의 비유전율 $\epsilon_r = 4.6$ 의 유전체를 사용하였다. 센서 출력 포트는 동축케이블로 연결되며, 다른 한쪽은 $50\ \Omega$ 의 칩저항을 설치해야한다.

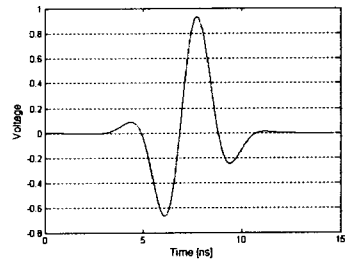
출력 선과의 임피던스 매칭을 위해 2선 평행 도선의 특성임피던스는 $50\ \Omega$ 로 하였다. 3차원 시뮬레이션 환경에서 슬롯 및 코일, 센서를 포함한 모델 전체를 해석하기는 어려우며 센서 자체의 성능을 확인하기 위하여 모델을 길이 방향으로 축소 시켰다. 그림 1은 마이크로 스트립 센서와 2선 평행 전송선로 센서의 구조를 보여준다. 시뮬레이션 해석은 크게 부분방전시 공극(void)에서 전자파의 전파경로에 대한 고찰, 시간영역에서의 고찰, 주파수 영역에서의 고찰로 이루어졌다.

2.2 부분방전시 전자파의 전파

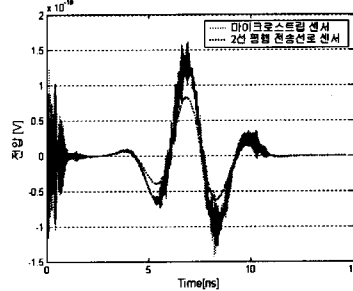
그림 2는 시뮬레이션에 사용된 해석모델을 보여 준다. 센서는 이 구조에서 wedge위에 설치된다. 방전펄스를 시뮬레이션하기 위해 주파수 영역에서 300MHz 의 sin 파를 공기로 채워진 크기 0.1mm^3 의 공극에 입력한 후 이것을 입력파로 하여 회전기내 슬롯 구조에서 전계 분포를 살펴 보았다. 시뮬레이션은 HFSS 3차원 툴을 사용하였다. 그림 3은 해석영역에서의 전계분포를 보여 준다. 결과적으로 도체인 코일과 슬롯 사이의 가이드 구조 사이에서 전자기 에너지가 전파됨을 확인 하였고 wedge 부분에서 구조의 불연속으로 인하여 전계가 크게 감소 됨을 알 수 있다. 그러므로 센서의 성능은 이러한 전자파 에너지를 얼마나 효과적으로 가이드 할 수 있는 가로 결정된다.

2.3 시간영역에서의 모의 실험

시간영역에서의 모의 실험은 CST의 MWS 3차원 툴을 사용하였다. 방전 펄스로 0.92V 의 가우시안펄스를 인가한 후 마이크로스트립 센서는 신호선과 접지의 중앙 지점에서 2선 평행 전송선로의 경우 두 원통 도체 사이의 중앙에서 시간에 따른 전계변화를 측정하였다. 입력 파형으로는 특정 시점에서 수 나노의 펄스 폭을 갖는 임의의 두개의 가우시안 펄스를 사용 하였다. 그림 4와 5는 시간영역에서 부분방전 두 입력 펄스와 두 센서에서 검출된 전압값을 비교하여 보여 주고 있다. 첫 번째, 두 번째 시뮬레이션에서 마이크로스트립 센서의 경

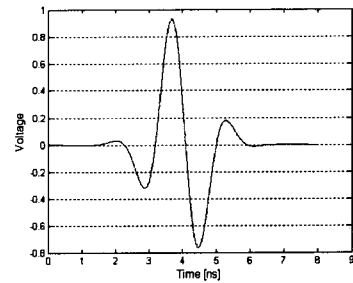


(a) 입력파형 1

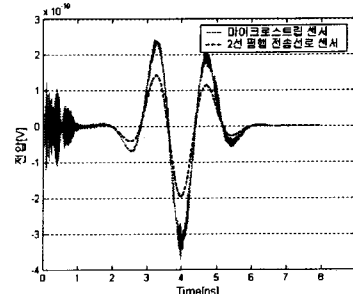


(b) 센서를 통한 전압의 출력파형 1

그림 4. 시간영역에서 센서의 성능 비교 1



(a) 입력파형 2



(b) 센서를 통한 전계의 출력파형 2

그림 5. 시간영역에서 센서의 성능 비교 2

우 각각 최대 $2 \times 10^{-7} [V/m]$, $3.08 \times 10^{-7} [V/m]$ 를 검출하였고 2선 평행 전송선로 센서의 경우 최대 $4.2 \times 10^{-7} [V/m]$, $7.94 \times 10^{-7} [V/m]$ 를 검출하였다. 이를 전압으로 계산하면 실제 측정되는 전압은 마이크로 스트립의 경우 $1.574 \times 10^{-10} [V]$, $2.3 \times 10^{-10} [V]$ 이며 2선 평행 전송선로 센서의 경우 $0.84 \times 10^{-10} [V]$, $1.4 \times 10^{-10} [V]$ 이 됨을 확인할 수 있었다. 센서의 성능 면만을 고려하면 마이크로 스트립 센서가 성능이 좋지만 기기의 안정성과 제작의 용이함, 그리고 고주파로 갈수록 성능이 향상됨을 고려해 볼 때 부분방전 고주파 검출 센서로 적합함을 알 수 있다.

2.4 주파수 영역에서의 고찰

주파수 영역에서 응답을 보기 위하여 그림 5와 같은 시간영역에서의 결과를 FFT(Fast Fourier Transform)하였다. 시간영역에서 살펴본 두 부분방전 입력 펄스의 주파수에서의 중심 주파수는 그림 7, 8에서와 같이 350MHz, 750MHz인 것을 확인할 수 있으며 마이크로 스트립 센서와 2선 평행 전송선로 센서를 통해 검출된 파형을 살펴본 결과 고주파에서 검출이 더 잘 됨을 확인할 수 있었다.

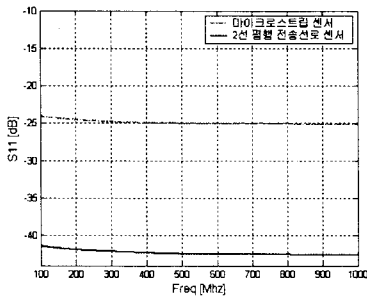


그림 6. 두 센서의 S파라미터 비교

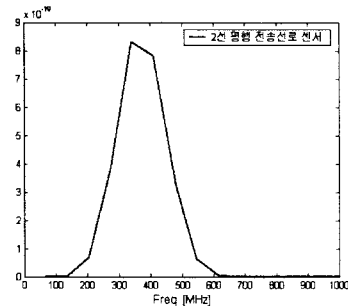


그림 7. 센서를 통해 검출된 부분방전 펄스의 주파수 응답 곡선 (중심주파수 350MHz)

실제 구조에 부착된 두 센서의 S 파라미터를 살펴본 결과 그림 6에서와 같이 마이크로 스트립 센서의 S11값은 100MHz와 1GHz에서 약 -25dB, 2선 평행 전송선로의 경우 약 -42dB으로 제안된 센서에서 반사가 덜 일어남을 확인할 수 있었다.

2.5 실제 구조에서 회전기기의 가동 시 센서의 영향에 대한 고찰

단일 슬롯, 단일 공극에서 부분방전 시뮬레이션을 한 결과 제안된 센서는 검출능력 면에서 마이크로 스트립 센서와 비교해 약간의 성능저하가 있지만 그 구조가 기기에 미치는 영향을 고려해 볼 때 기기 운전중 부분방전 센서로 적합한 구조라 할 수 있다. 부분방전 특성상 방

전은 근접 코일에서도 일어나는 다중 방전의 형태이므로 접지부분이 외부 전자파 차폐효과를 갖는 마이크로 스트립보다 제안된 센서를 회전기기 권선에 설치 시 이 효과로 인하여 더 많은 전자파를 검출할 수 있을 것으로 예

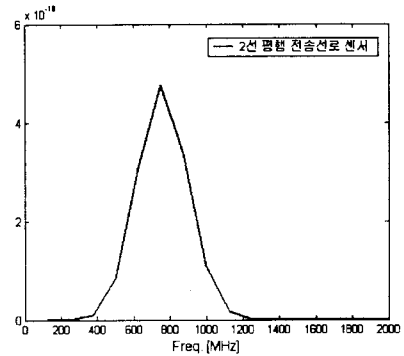


그림 8. 센서를 통해 검출된 부분방전 펄스의 주파수 응답 곡선 (중심주파수 750MHz)

상된다. 마이크로 스트립 센서의 경우 도체로 이루어진 접지면이 센서 윗 부분 전면에 썩어져 있어서 결과적으로 센서를 실제 구조에 설치 시 코일의 윗 부분이 도체로 덮이게 되는 결과를 초래한다. 실제 발생되는 다중 방전을 검출하기 위해 센서를 회전기기내 여러 개 설치할 시 마이크로 스트립 센서의 경우 센서의 도체면에서 일어나는 와전류 등과 같은 효과를 신중히 고려해야 한다. 제안된 센서는 작은 도체 선을 이용하므로 기존 센서에 비해서 기기 운전 시 기기 성능에 영향을 덜 미치게 되며 이러한 것을 종합해 볼 때 기기 운전중 부분방전 센서로 적합한 구조이다.

3. 결 론

본 논문에서는 효과적인 부분방전 측정을 위한 2선 평행 전송선로에 기반을 둔 센서를 제안 하였다. 센서의 전체 크기는 회전기기내 설치 가능한 작은 크기이며, 센서 설계의 주안점은 기기 운전 시 기기의 성능에 영향을 크게 미치지 않을 정도의 작은 크기의 신호 및 접지 라인에 두었다. 센서의 성능을 검증하기 위하여 수치해석에 기반을 둔 3차원 시뮬레이션 툴을 통하여 기존 마이크로 스트립 센서와 비교 분석 하였고, 결과적으로 작은 접지와 신호라인을 가지는 구조의 센서로서 좋은 전자파 검출 특성을 얻을 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] H. G. Sedding, R. R. Campbell, G. C. Stone, G. S. Klempner, "A New Sensor for Detecting Partial Discharges in Operating Turbine Generators," IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 6, No. 4, pp.700-706, Dec. 1991
- [2] S. M. Tetrault, G. C. Stone, H. G. Sedding, "Monitoring Partial Discharges on 4-kV Motor Windings," IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 35, No. 3, pp.682-688, May/June. 1999.
- [3] D. Pommerenke, R. Jobava, R. Heinrich, "Numerical Simulation of Partial Discharge Propagation in cable Joints Using the Finite Difference Time Domain Method," IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 18, No. 6, pp.6-11, 2002.
- [4] S. Sakaguchi, and M. Oyama, "Application of Maxwell Solvers to PD Propagation- Part III : PD Propagation in GIS," IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 19, No. 1, pp. 6-12, 2002.